

*Н.И. ЗАПоловский*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
*В.И. Носков*, канд. техн. наук, ГП "Электротяжмаш",  
*Н.В. Мезенцев*, НТУ "ХПИ",  
*Н.В. Горбач*, НТУ "ХПИ"

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Розглянуто побудову системи керування електроприводом змінного струму з використанням методів нечіткої логіки. Показано, що використання регулятора, побудованого на основі методів нечіткої логіки, дозволяє зменшити величину перерегулювання, поліпшити динамічні характеристики системи керування. Наведено результати моделювання досліджуваної системи в середовищі MATLAB.

The construction of the control of electric drive of alternating current system with the use of methods of fuzzy logic is considered. It is shown that the use of regulator, built on the basis of methods of fuzzy logic, allows to decrease the size of overcorrection, improve dynamic descriptions of the control system. The results of the design of the explored system in the environment of MATLAB are resulted.

**Постановка проблемы.** Современный тяговый электропривод представляет собой конструктивное единство электромеханического преобразователя энергии (двигателя), преобразователя частоты и устройства управления. Рост степени интеграции в микропроцессорной технике и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам со встроенным набором специализированных периферийных устройств привел к замене аналоговых систем управления приводами на системы непосредственного цифрового управления. Переход к широкодиапазонным быстродействующим приводам транспортных средств требует применения более сложных систем векторного управления, которое является наиболее точным в динамике и статике, а также более экономичным.

Как при частотном, так и при векторном способе управления, необходимо осуществлять управление процессом разгона локомотива с учетом протекания электромагнитных процессов и оптимизации энергетических затрат, что требует, в свою очередь, создания эффективных систем управления. Одним из критериев качества протекания электромагнитных процессов является величина перерегулирования, которая не должна превышать некоторого максимального значения в переходных режимах. В последние годы решение этих задач предлагается выполнять с использованием современных технологий, в основе которых лежат методы анализа и синтеза сложных технических систем, в частности, систем векторного управления и систем нечеткого управления, используя при этом прямое цифровое управление моментом. Отличительной особенностью этих решений является предельно высокое быстродействие систем управления, реализованных, как правило, на базе цифровых регуляторов или регуляторов, работающих на принципах нечеткой логики.

**Анализ литературы.** В работах [1 – 4] рассмотрены методы синтеза систем управления на основе нечеткой логики и нейронечетких сетей, которые интенсивно развиваются в последнее десятилетие. Здесь, с одной стороны, нечеткие системы управления используются для объектов управления, модель которых неизвестна, а с другой – как альтернатива классическим системам управления. Показано, что важным достоинством нечетких систем управления является возможность их обучения на примерах. Здесь же приведен ряд возможных архитектур для построения нечетких систем управления.

Построение систем векторного управления асинхронными электроприводами рассмотрено в ряде публикаций [5 – 7]. В [5, 6] анализируются общие принципы векторного управления электроприводами, в частности, построение систем векторного управления с использованием стандартных П-, ПИ-, ПИД-регуляторов. Наиболее полно способы применения современных средств искусственного интеллекта (нечеткой логики, нейронных сетей) в управлении электроприводами описаны в работах [7, 8]. Однако здесь недостаточно внимания уделено вопросам построения систем управления с использованием методов нечеткой логики для конкретных типов электроприводов и нет сравнительного анализа систем управления на основе нечеткой логики с известными системами, содержащими классические регуляторы.

**Целью статьи** является разработка системы управления с использованием методов нечеткой логики для электропривода дизель-поезда с тяговыми асинхронными двигателями и проведение сравнительного анализа с помощью моделирования динамических характеристик систем с разработанным и стандартным ПИ-регулятором.

**Реализация решения задачи синтеза.** На рис. 1 приведена структура системы векторного управления тяговым двигателем электропривода дизель-поезда с использованием нечеткого контроллера по угловой скорости двигателя. Здесь:  $\omega_p^3$  – сигнал задания скорости вращения ротора тягового асинхронного двигателя; БВОП – блок вычисления ошибки и ее производной; БИ – блок интегрирования;  $GE^1$ ,  $GC^1$ ,  $GU$  – блоки умножения (деления) на масштабные коэффициенты; НК – нечеткий контроллер; ПНЗ – блок перехода к нечетким значениям; БП – база правил для нечеткого контроллера; БПП – блок применения правил; БД – база

данных; ПЧЗ – блок перехода к четким значениям; БВУ – блок векторного управления; АД – асинхронный двигатель. Сигналы ошибки и производной ошибки преобразуются блоками  $GE^{-1}$  и  $GC^{-1}$  в соответствующие сигналы в относительных единицах  $e$  и  $ce$  путем деления на масштабные коэффициенты. Аналогично, выходной управляющий сигнал  $u$  (для системы с векторным управлением соответствует току задания  $i_{qs}^{zd}$ ) вычисляется путем умножения выходного сигнала в относительных единицах  $du$  на масштабный коэффициент  $GU$ , с последующим его интегрированием блоком БИ для получения  $u$ .

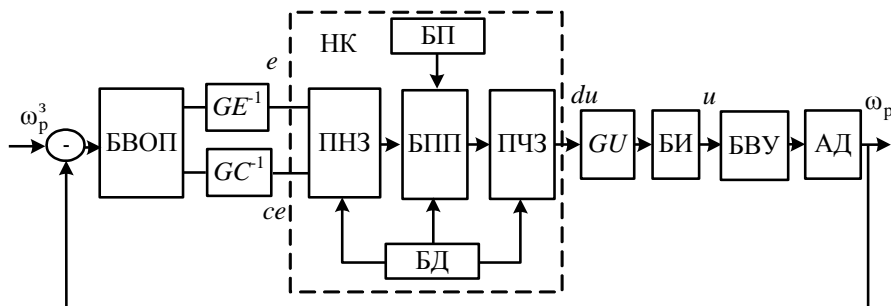


Рис. 1. Структура нечеткого контроллера в системе управления с обратной связью

На вход нечеткого контроллера поступают два сигнала:  $e$  и  $ce$ . Нечеткий контроллер, на основании значения сигнала ошибки  $e$  по угловой скорости и сигнала ошибки по производной угловой скорости  $ce$ , изменяет выходной сигнал  $du$  так, что бы текущая скорость  $\omega_p$  соответствовала задаваемой скорости  $\omega_p^{zd}$ .

Выходной сигнал  $du$  нечеткого контроллера в системе векторного управления асинхронным двигателем электропривода соответствует величине тока задания  $\Delta i_{qs}^{zd}$  [6]. После его интегрирования блоком БИ получаем среднее значение сигнала  $u$ , пропорционального току задания  $i_{qs}^{zd}$ .

Для описания нечеткого контроллера используем понятия лингвистической и нечеткой переменной [1].

Определение 1. Лингвистической переменной называется пятерка  $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$ , где  $\beta$  – наименование лингвистической переменной;  $T$  – терм-множество или множество словесных значений, представляющих наименование нечетких переменных, областью определения которых является базовое множество  $X$ ;  $G$  – синтаксическая процедура, позволяющая оперировать с элементами множества  $T$ , например, порождать новые термы;  $M$  – семантическая процедура, позволяющая превращать каждый новый терм (значение) лингвистической переменной, полученный с помощью синтаксической процедуры  $G$ , в нечеткую переменную.

Вербальные (или словесные) значения лингвистической переменной описываются нечеткими переменными.

Определение 2. Нечеткой переменной называется тройка  $\langle \alpha, X, \tilde{A} \rangle$ , где  $\alpha$  – название нечеткой переменной;  $X$  – базовое множество (область определения  $\alpha$ );  $\tilde{A} = \mu_{\tilde{A}}(x) | x \in X$  – нечеткое множество на  $X$  ( $A \subset X$ ), задающее ограничения на значение нечеткой переменной  $\alpha$ .

Введем следующие лингвистические переменные:

$E$  – сигнал ошибки по угловой скорости;  $E = \langle \text{сигнал ошибки по угловой скорости}, T_E = \{Z_1 - \text{нулевой сигнал ошибки}; NS_1 - \text{небольшой отрицательный}; NM_1 - \text{средний отрицательный}; NB_1 - \text{большой отрицательный}; PS_1 - \text{небольшой положительный}; PM_1 - \text{средний положительный}; PB_1 - \text{большой положительный}\}, X = [-1, 1], G, M \rangle$ ;

$CE$  – сигнал ошибки по производной угловой скорости;  $CE = \langle \text{сигнал ошибки по производной угловой скорости}, T_{CE} = \{Z_2 - \text{нулевой сигнал по производной ошибки}; NS_2 - \text{небольшой отрицательный}; NM_2 - \text{средний отрицательный}; NB_2 - \text{большой отрицательный}; PS_2 - \text{небольшой положительный}; PM_2 - \text{средний положительный}; PB_2 - \text{большой положительный}\}, X = [-1, 1], G, M \rangle$ ;

$DU$  – сигнал нечеткого управления,  $DU = \langle \text{сигнал нечеткого управления}, T_U = \{Z_3 - \text{нулевой сигнал управления}; NVS_3 - \text{очень малый отрицательный}; NS_3 - \text{небольшой отрицательный}; NM_3 - \text{средний отрицательный}; NB_3 - \text{большой отрицательный}; PVS_3 - \text{очень малый положительный}; PS_3 - \text{небольшой положительный}; PM_3 - \text{средний положительный}; PB_3 - \text{большой положительный}\}, X = [-1, 1], G, M \rangle$ .

На рис. 2 приведены функции принадлежности нечетких лингвистических переменных  $E, CE, DU$ . Областью определения всех нечетких переменных является интервал  $[-1, 1]$  относительных значений соответственно сигналов ошибки по угловой скорости и по производной угловой скорости и по сигналу управления.

Формирование выходного сигнала нечетким контроллером осуществляется на основе нечетких правил, представленных в табл.

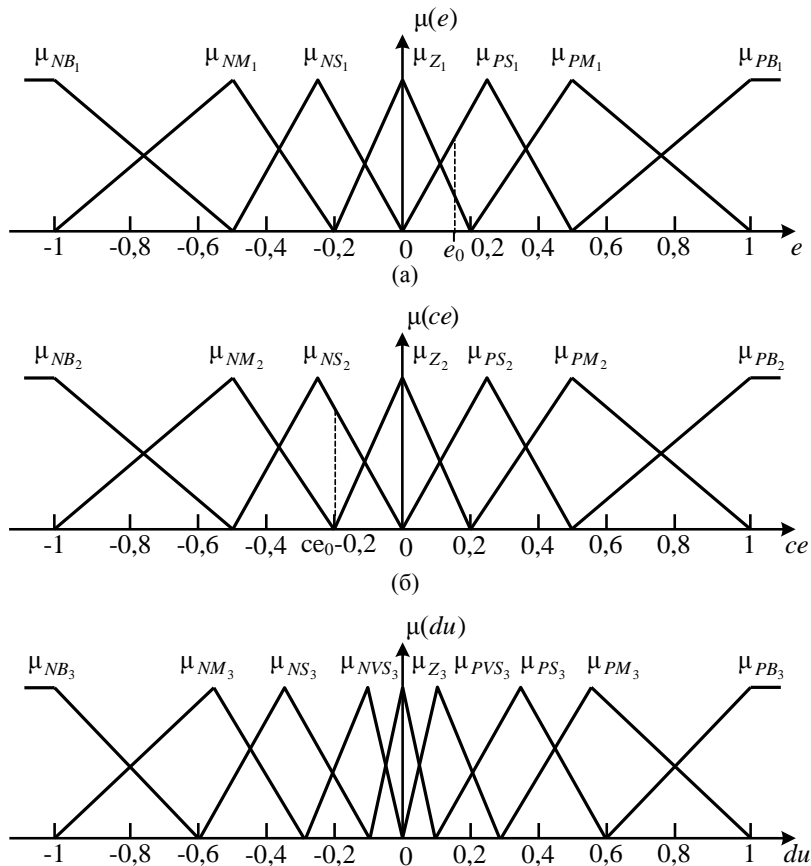


Рис. 2. Множество функций принадлежности нечетких переменных: сигнала ошибки по угловой скорости (а), сигнала ошибки по производной угловой скорости (б), сигнала нечеткого управления (в)

$E \backslash CE$	$NB_1$	$NM_1$	$NS_1$	$Z_1$	$PS_1$	$PM_1$	$PB_1$
$NB_2$	$NB_3$	$NB_3$	$NB_3$	$NM_3$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$
$NM_2$	$NB_3$	$NB_3$	$NM_3$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$
$NS_2$	$NB_3$	$NM_3$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$
$Z_2$	$NM_3$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$	$PM_3$
$PS_2$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$	$PM_3$	$PB_3$
$PM_2$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$	$PM_3$	$PB_3$	$PB_3$
$PB_2$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$	$PM_3$	$PB_3$	$PB_3$	$PB_3$

На рис. 3 приведена иллюстрация принципа формирования сигнала управления  $DU$  на основе двух правил с использованием метода Мамдани [7].

Нечеткий контроллер работает следующим образом. По известным в относительных единицах четким значениям сигнала ошибки по угловой скорости ( $e = e_0$ ) и сигнала ошибки по производной угловой скорости ( $ce = ce_0$ ), и по функциям принадлежности нечетких переменных  $E$  и  $CE$  определяются одно или два значения этих переменных. В рассматриваемом примере при  $e_0 = 0,13$  и  $ce_0 = -0,2$  определяются два значения лингвистической переменной  $E$  ( $Z_1$  и  $PS_1$ ) и одно значение лингвистической переменной  $CE$  ( $NS_2$ ) (см. рис. 2). Число значений лингвистических переменных  $E$  и  $CE$  определяет число правил управления. Если имеется по одному значению переменных  $E$  и  $CE$ , то нечеткое правило управления одно, если имеется два значения у одной переменной и одно у другой, то правил два, если по каждой переменной – два значения, то правил – четыре. Правила определяются по значениям лингвистических переменных с помощью вышеприведенной таблицы. В рассматриваемом примере с помощью нечетких переменных  $Z_1 = \{ \mu_{Z_1}(e)|e \}$ ,  $PS_1 = \{ \mu_{PS_1}(e)|e \}$ ,  $NS_2 = \{ \mu_{NS_2}(ce)|ce \}$  определяются следующие два нечетких правила:

Правило 1: Если  $E = Z_1$  и  $CE = NS_2$ , то  $DU = NVS_3$ .

Правило 2: Если  $E = PS_1$  и  $CE = NS_2$ , то  $DU = Z_3$ .

Затем находится степень истинности предпосылок для этих правил:  $\mu_{Z_1}^\circ = \mu_{Z_1}(e_0)$ ,  $\mu_{PS_1}^\circ = \mu_{PS_1}(e_0)$ ,  $\mu_{NS_2}^\circ = \mu_{NS_2}(ce_0)$  (см. рис. 2 и 3). На следующем этапе происходит "отсечение" функций принадлежности  $\mu_{NVS_3}$  и  $\mu_{Z_3}$  заключений рассматриваемых правил на уровнях  $\mu_{NVS_3}^\circ = \min(\mu_{Z_1}^\circ, \mu_{NS_2}^\circ)$ ,  $\mu_{Z_3}^\circ = \min(\mu_{PS_1}^\circ, \mu_{NS_2}^\circ)$  (рис. 3). Усеченные функции принадлежности заключений разных правил объединяются с помощью операции max,

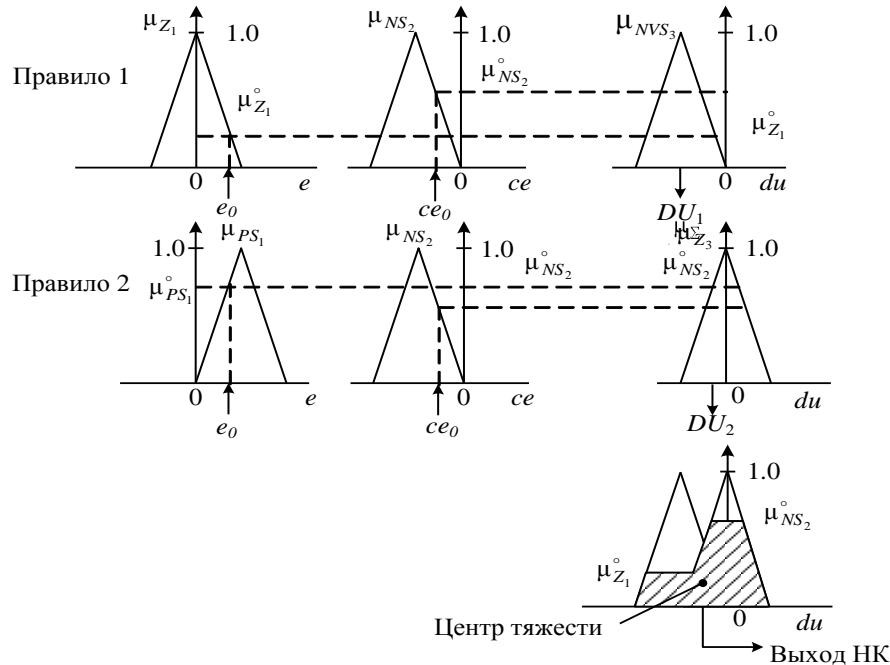


Рис. 3. Принцип работы нечеткого контроллера на основе двух правил

в результате чего получается функция принадлежности  $\mu_{\Sigma}(du)$ , соответствующая нечеткому выводу для выходной лингвистической переменной  $DU$ . На заключительном этапе с помощью метода Мамдани определяется четкое значение сигнала управления.

Поскольку нечеткий контроллер выполняет функцию статического нелинейного преобразования, то можно записать действия контроллера в форме:

$$K_1 e + K_2 ce = du, \quad (1)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – нелинейные коэффициенты.

С учетом процесса интегрирования получаем среднее значение сигнала  $u$ , пропорциональное току задания  $i_{qs}^{зд}$  в соответствии с выражением:

$$u = K_1 \int edt + K_2 e, \quad (2)$$

что является формой записи нечеткого ПИ-контроллера с нелинейными коэффициентами. Подобным образом можно записать алгоритм нечеткого контроллера для П- и ПИД-контроллеров.

Нелинейные адаптирующиеся в процессе функционирования коэффициенты в нечетком контроллере позволяют устойчиво формировать сигналы управления при изменении параметров системы в процессе функционирования.

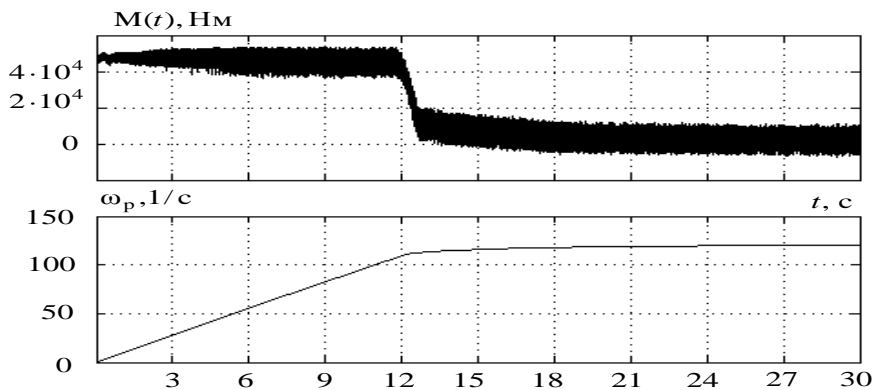


Рис. 5. Зависимости  $M(t)$ ,  $\omega_p(t)$  (ПИ-регулятор с использованием нечеткой логики).

Результаты моделирования системы управления электроприводом с использованием стандартного ПИ-регулятора и построенного с использованием нечеткой логики в среде MATLAB соответственно показаны на рис. 4 и рис. 5. Верхний график – зависимость электромагнитного момента от времени  $M(t)$ , нижний – скорости вращения ротора двигателя от времени  $\omega_p(t)$ .

**Выводы.** Проведенные исследования синтезированной системы векторного управления тяговым электроприводом подтвердили эффективность применения методов нечеткой логики при проектировании регуляторов. Перерегулирование в случае использования стандартного ПИ-контроллера, которое наблюдается на рис. 4, составляет 14%, при использовании нечеткого контроллера перерегулирование практически отсутствует. К тому же, в первом случае в переходном режиме двигатель электропривода может перейти в генераторный режим, что не допустимо в процессе функционирования системы. В дальнейшем разработанные модели предлагается использовать для разработки систем управления тяговым электроприводом и их исследования в замкнутой системе регулирования с учетом различных масс состава.

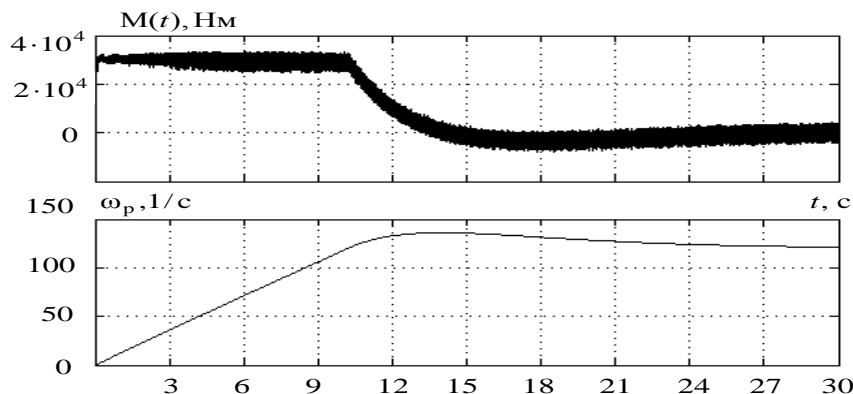


Рис. 4. Зависимости  $M(t)$ ,  $\omega_p(t)$  (стандартный ПИ-регулятор)

**Список литературы:** 1. Ярушикина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем: Учебное пособие. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с. 2. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики: Учебное пособие. – Уфа: УГАТУ, 1997. – 220 с. 3. Verbruggen H.B., Babushka R. Constructing fuzzy models by product space clustering // Fuzzy model identification. – Berlin: Springer, 1998. – P. 53 – 90. 4. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае. В 2-х томах. Том 2. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 464 с. 5. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла. С-Пб. 2002. – 39 с. 6. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с. 7. Vimal K. Bode Modern Power Electronics and AC Drives. – Prentice-Hall PTR 2002. – 738 с. 8. Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Запововский Н.И., Леонов С.Ю. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. – Харьков: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с.

Поступила в редакцию 14.04.2006